

智慧化隧道維護管理系統之展望

高憲彰* 蕭富元**

摘要

隧道之於地狹人稠的臺灣，在水電及交通運輸上扮演極重要的角色。營運隧道一旦出現結構損傷或服務功能大幅降低時，維修補強難度通常甚高。目前隧道維護管理的思維，已由以往被動式損壞後再修復觀念，轉變為主動預防式維護與延壽導向，透過管理系統掌握隧道結構安全性能變化，並提供管理決策建議已為當今的潮流。近年來國內已陸續有主管機關依據其需求，發展不同特性的隧道維護管理系統，然目前均僅著重於隧道結構安全維護，實則營運效能管控亦為管理要點。隨工業 4.0 興起，透過 AI 人工智慧、物聯網技術，以及大數據分析，經由新一代智慧化系統之整合，逐步實現智慧化隧道營運管理目標將指日可待。

關鍵字：隧道維護、管理系統、物聯網整合、智慧化隧道

一、前言

臺灣地區人口稠密，土地資源有限，為有效利用地下空間，減少徵用民地，故在水力、交通、電力等各項較具規模的國家工程建設中，採用相當比例的地下隧道工程。回顧臺灣的隧道工程發展，從西元 1820 年完成之大溪鎮月眉圳隧道開始，到近期（2020 年 1 月）營運通車的台 9 線蘇花改隧道群，已有約兩百年歷史，根據中華民國隧道協會的統計資料，臺灣已完成的隧道總長度已超過 800 公里，同時臺灣隧道的長度仍持續增加當中，根據交通部公路總局 107 年年報資料，臺灣公路隧道長度在 2015~2018 年間以每年約 10 公里速率增加，在面積狹小的臺灣，隧道密度及長度之高彰顯其角色之重要性。

大規模興建隧道之後，所面臨的問題為營運維護管理議題。所有隧道均其使用壽命，營運隧

道可能因外力影響、襯砌材質老朽劣化等因素，導致其使用年限或服務品質功能降低。由於隧道為線型管狀構造，一旦結構體出現損傷破壞或服務功能大幅降低時，維修補強難度通常甚高。為有效執行隧道的維護管理工作，確保隧道營運功能，並保障用路人安全，各國除致力發展各種先進隧道檢監測技術及維修補強工法外，亦著手進行隧道維護管理系統的建置，透過資料庫系統，掌握隧道結構安全性能與服務功能變化，進而採取相對應的管理作為與維護資源的調度分配。

傳統的隧道維護管理系統，多著重於土木結構及機電設施基本資料建置、巡檢及監測資料蒐集、養護及維修計畫管控等。然而隨工業 4.0 之興起，透過物聯網整合資料與服務，協助企業做決策已成為未來的趨勢，目前此趨勢亦逐漸應用於公共建設的全生命週期管理，例如我國政府近年推動的智慧交通、智慧城市、智慧水管理、智慧

* 中興工程顧問社大地工程研究中心副主任

** 中興工程顧問社大地工程研究中心地工維安組組長

河川等，顯見資通訊應用於隧道全生命週期的管理應為未來趨勢。目前全球各先進國家已開始朝向隧道的智慧化管理邁進，綜觀其智慧化管理系統內容除傳統的基本資料建置、結構安全檢監測資料蒐集及維護計畫之控管外，更藉由物聯網技術大量監測資料的蒐集，進行營運安全管理，依此建構新一代的智慧化隧道維護管理系統。

二、隧道維護管理觀念演進

在公共建設已邁入維護管理階段的歐美先進國家，運用有限經費維護隧道安全與服務性能已成為重要課題。早期隧道維護管理主要係於隧道發生事件與老劣化後，再進行必要的維護與改善。但1999年起歐洲連續發生多起隧道重大事故後，全面性安全風險評估與主動式維護管理逐漸引起重視。目前國際上的管理思維，已由以往一次性的安檢與修復觀念，轉化為「預防式維護」與「延壽」導向（圖1），事先掌握隧道性能狀況，追蹤其老劣化速率，辨識可能風險與風險承受程度，再依據維修迫切性與經費狀況，持續進行隧道維護管理。

在預防維護與延壽的理念下，隧道資料的掌握乃極為重要，資料型態包括「維護項目」、「空間位置」及「時間序列」等，考量資料量多龐大繁瑣，資料保存不易，且管理人員亦可能有所異動，因此架構於採集、儲存、分析及顯示之資料庫系統，已成為當前隧道營運管理的潮流與趨勢。在2012至2017年間歐洲9國（法國、英國、德國、瑞士、荷蘭、義大利、西班牙、希臘、愛沙尼亞）共21個單位共同推動跨國大型隧道研究計畫 NeTTUN (New Technologies for Tunneling and Undergroud Works)，該計畫在隧道營運部分即發展診斷決策系統 (Decision Support System；簡稱 DSS)。該系統開發理念即依循專業工程師的研判程序，根據隧道基本資訊及定期檢監測資料，再加上專業知識及風險評估，進一步診斷隧道異狀與必要的處理決策，如圖2所示。

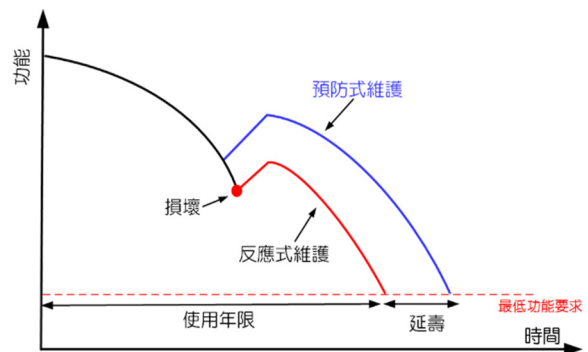


圖1 主動預防維護與延壽概念圖

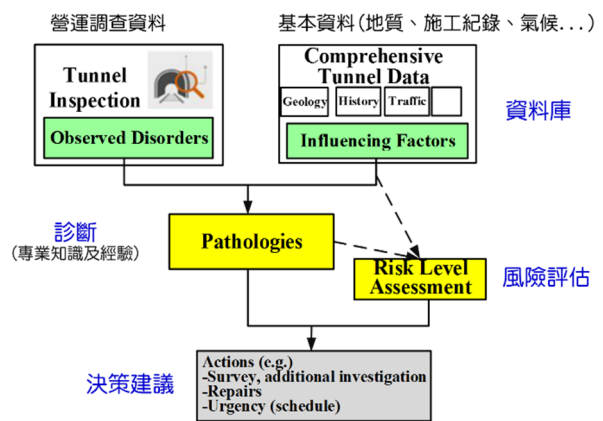


圖2 歐洲隧道維護管理決策流程示意圖

三、國道隧道維護管理系統

國內的隧道維護管理系統發展時間點略早於上述歐洲 DSS 診斷決策系統，主要推動者為交通部高速公路局（簡稱高公局）。高公局所轄管的國道隧道已有 58 座隧道，隧道總長度約 81.3 公里，因此乃於 2011 年首先針對國內最長的公路隧道-雪山隧道，委託中興社開發國道隧道維護管理系統。系統開發工作於 2013 年底完成，2014 年初上線運作，2016 年 6 月完成系統保固期驗收後，高公局決定將該系統擴展應用於全台的國道隧道，並於 2017 年底推動後續擴充專案，系統功能擴充於 2018 年底完成，目前正辦理系統移機作業。

高公局的國道隧道維護管理系統，主要係由核心的隧道資料庫及 4 個不同功能的子系統所組成，如圖 3 所示。隧道資料庫橫跨規劃、設計、

施工及維護管理等各階段資料，包括：1.新工階段的設計與施工資料、竣工圖說、地質與岩體評分資料等，以及2.營運階段持續新增的檢監測資料、維修補強紀錄等；4個子系統則分別為：1.維護管理資料建置子系統、2.安檢資料記錄子系統、3.維護管理資料查詢子系統及4.隧道資料管控子系統。依序簡要說明如下：

1. 維護管理資料查詢子系統：提供具有系統查詢權限人員（例如主管機關決策者、隧道安檢人員等），於網頁上查詢隧道維護管理各項資料，並可進行資料下載與分析。使用者於進入本子系統時，需先登入進行身份確認（圖4），再依據管理組織應有權限，逐層進入進行權責範圍資料查詢與下載。
2. 安檢資料記錄子系統：提供隧道安檢執行廠商，於單機版上執行隧道安檢工作的資料記錄、統計、維修建議及各式報表輸出功能，此子系統資料記錄係以各年度維管作業持續變動資料為主。
3. 維護管理資料建置子系統：主要提供系統開發團隊及安檢工作廠商，在單機版執行既有維護管理資料新增與編輯功能。
4. 隧道資料管控子系統：提供系統管理人員進行各年度隧道安檢資料傳輸匯入及匯出功能。

國道隧道維護管理系統有其發展環境背景，高公局所轄管隧道具有對象設施單一化（均為國道等級隧道）、維管作業標準化（每年度委外辦理）等特性，因此系統架構分為單機版及網頁版，主管機關透過網頁查詢下載所需資料，系統核心資料庫則由系統管理人員負責維護，委外的隧道安檢廠商僅使用單機版進行該年度的檢監測資料初步建置，待所有資料確定無誤後，再由系統管理人員進行資料輸入與編修，除系統維管人員之外，管理機關人員及安檢廠商均未直接碰觸核心資料庫，降低核心資料庫遭誤植或誤刪風險。

國道隧道維護管理系統雖已上線運作數年，惟其功能主要仍停留於資料建置與查詢，並未發

展資料庫的加值應用，例如透過數據分析及資料比對，探討營運管理基準；或可進一步結合風險評估，發展管理決策輔助功能等，如圖5所示，乃為系統發展殊為可惜，並有待加強之處。

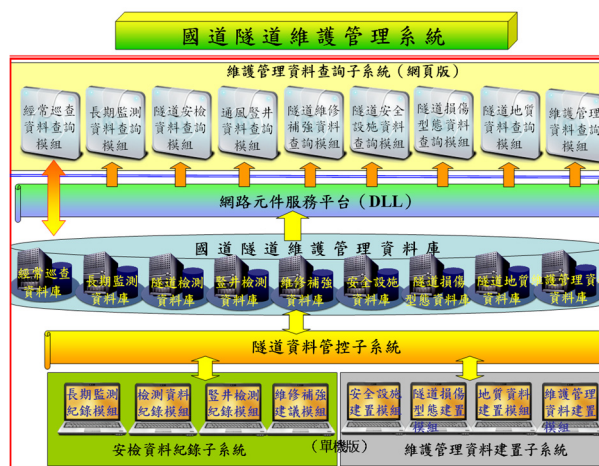


圖3 國道隧道維護管理系統架構圖



圖4 維護管理資料查詢子系統登入畫面

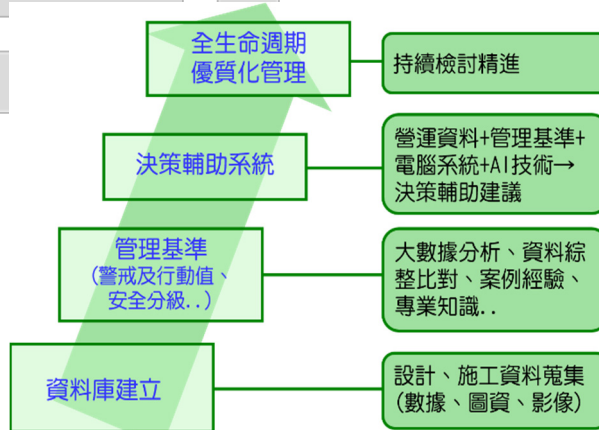


圖5 隧道全生命週期管理系統發展程序示意圖

四、公路總局隧道維護管理系統

公路總局轄管隧道在 2018 年底已達 398 座，總長度達 107.3 公里，部分已有二、三十年營運歷史，甚至四、五十年者亦不在少數。公路總局所轄隧道類型複雜（包括裸岩隧道、混凝土隧道、明隧道、長大隧道、單線小斷面隧道等），乃依隧道設施種類與重要性，將轄管隧道分為甲、乙、丙、丁、戊五個不同安全等級，養護作業係以 2013 年交通部公路總局所頒佈之公路養護手冊為依據辦理，主要仍以紙本表單紀錄為主。因此公路總局乃於 2019 年以新近通車的台 9 線蘇花改隧道群為對象，發展公路總局隧道維護管理系統，該系統亦由中興社負責開發，預計於 2020 年中旬完成系統雛型版本。

公路總局的隧道維護管理作業與高公局不同，多數係由各養護工程處自辦，因此高公局所採用的單機版資料建置構想不適用於公路總局，公路總局隧道系統基本上採用全網頁版，系統架構如圖 6 所示，圖中左半灰色區塊為系統核心資料庫，資料種類包含隧道營運前（設計及施工）所產生的靜態資料，以及營運後持續新增的動態

資料，包括營運監測資料、巡查資料及檢測資料等。主管機關則透過系統各功能模組進行資料的查詢與存取，進行管理作為決策依據。系統的 7 個功能模組分別為：1.基本資料模組、2.巡查資料模組、3.損傷紀錄模組、4.監測資料模組、5.影像掃描模組、6.維修資料模組、7.重要訊息模組，如圖 7 所示。

考量全臺公路隧道數量將持續增加，同時隧道的維護管理資料亦將持續累積，未來系統將面對巨量資料挑戰。因應方式為系統資料庫僅儲存可明確定義的結構化資料（如數據或文字資料），而對於無結構特性的非結構化資料（如圖片、影片、pdf 檔等），則將實體檔案儲存於伺服器上，再透過程式存取指令與相對應檔案路徑，自伺服器中取得或儲存非結構化資料。此種資料庫設計可兼具結構化資料所具備的快速查詢與低儲存空間優點，同時亦可儲存非結構化資料，保留系統資料儲存彈性與擴充性。此外，亦考慮資料存取頻率，將資料分為「線上資料庫」與「歷史資料庫」。線上資料庫儲存較頻繁存取資料，例如隧道基本資料及近年新增資料；而對於存取次數較

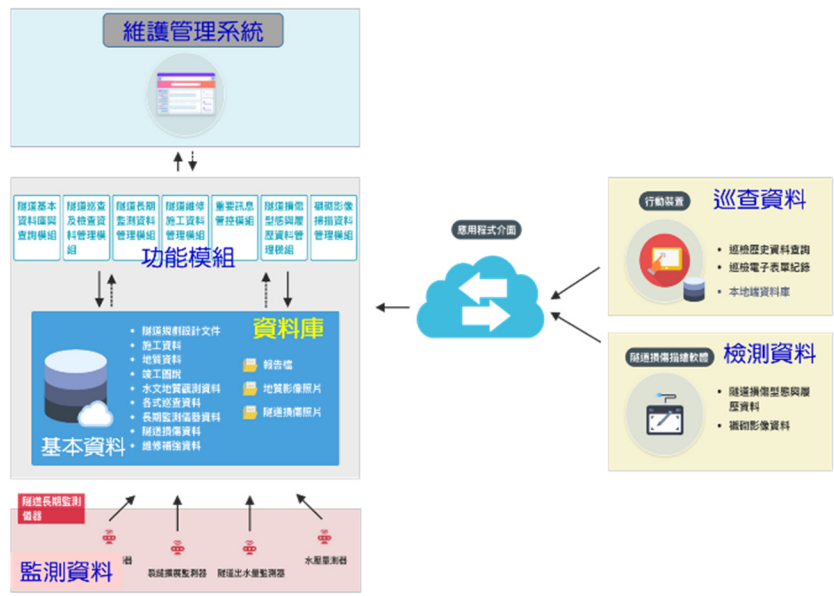


圖 6 公路總局隧道維護管理系統架構示意圖

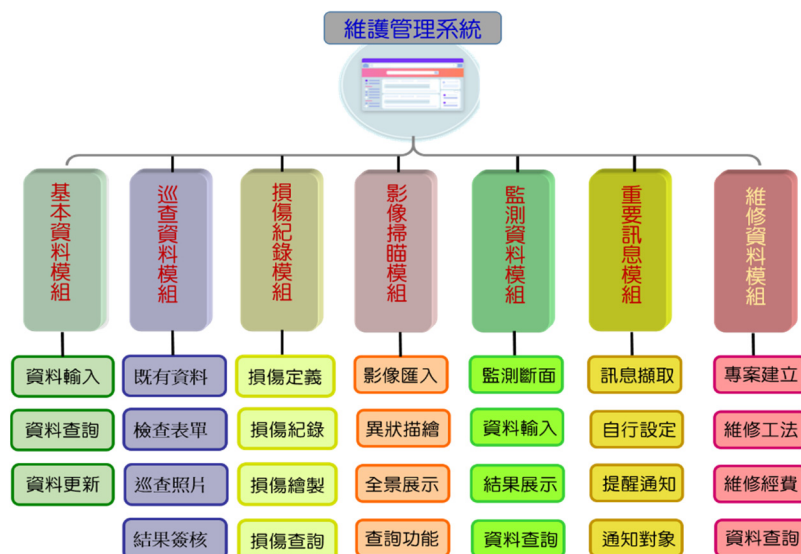


圖 7 公路總局隧道維護管理系統各模組功能示意圖

少的資料，則存放到歷史資料庫。系統定期將較舊資料轉移到歷史資料庫中，可降低線上資料庫負荷量，提升頻繁存取資料的查詢效能，避免資料庫資料因長期累積而影響系統效率。

五、智慧化隧道管理系統展望

隨工業 4.0 興起，透過物聯網整合資料與服務，協助企業決策已成為未來趨勢。展望未來，新一代智慧化隧道維護管理系統的發展，除新型科技技術的導入外，勢必再包含大數據分析、AI 人工智慧、資通訊科技應用等領域。探討說明如下：

(一) 新科技技術導入

以往隧道巡查工作，主要以目視檢查為主，再輔以簡單器具及照片佐證之。近年來隨著科技快速發展，各種新型隧道檢監測技術亦有驚人的發展，例如 Lidar 影像掃描、3D 透地雷達探測等。Lidar 影像掃描可全面記錄隧道襯砌表面各種異狀及損傷分布，再經由不同時期的掃描比對，可進一步研判損傷劣化速率；另透過 3D 透地雷達探

測，則可解析肉眼無法辨識的襯砌內部缺陷及襯砌背後狀況。近年來，甚已有可同時進行多項調查的檢測車與自走式機器人問世，如圖 8 及圖 9，結合各種新科技探查資料，可更精確掌握隧道結構體安全性能，提供維護決策參考。

新科技的導入，雖可達調查高速化、成果多樣化及精度提升等優點，但相對衍生巨量資料儲存及解析問題，未來新一代隧道維護管理系統需能將各種新科技的專業巨量調查資料納入（如圖 10），此對於系統開發是一個艱鉅任務，包括資料解析的專業問題，以及如何在頻寬有限網路上快速呈現與處理巨量調查成果，問題的克服有賴專業領域人員加入系統程式的開發。

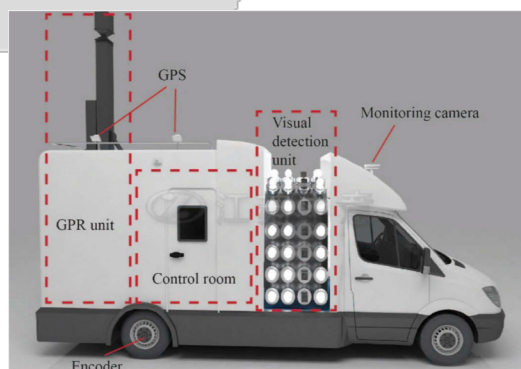


圖 8 搭載多項探查設備之隧道檢測車



圖 9 隧道自走式探測機器人

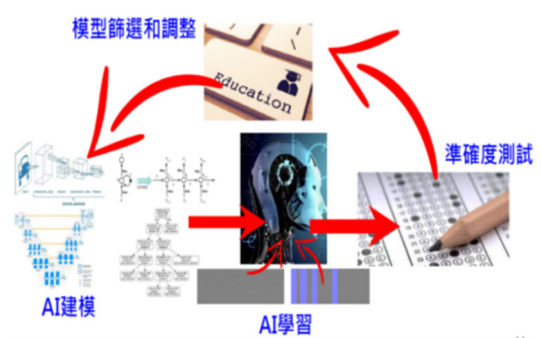


圖 11 AI 人工智慧資料解析判釋示意圖

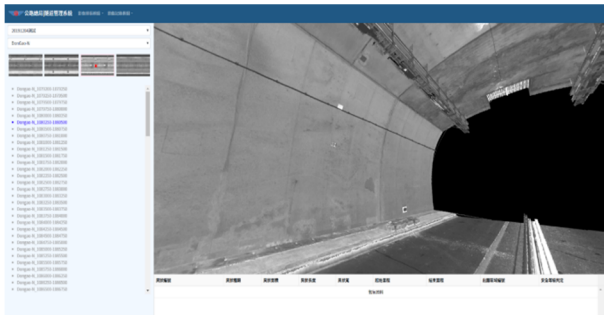


圖 10 隧道襯砌影像掃描成果全景展示

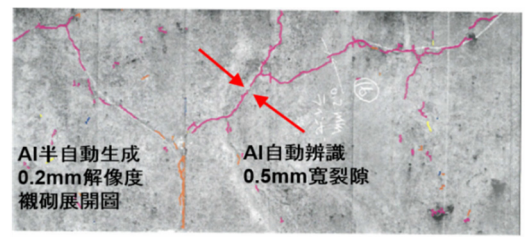


圖 12 AI 技術應用於襯砌影像掃描判釋

(二) AI 人工智慧應用

2010 年代在高性能電腦、網際網路、感測器發展，以及計算成本下降狀況下，透過機器學習 (Machine Learning) 所發展出仿人類智慧辨識聲音影像，或針對問題可做出判斷的 AI 人工智慧浪潮，亦逐漸襲捲至隧道維護管理領域。近年來在全球各國均可見透過各種 AI 人工智慧技術解析隧道探查資料的研究，例如以 AI 技術自動或半自動判釋隧道襯砌影像掃描裂縫及滲水等各種異狀，或透過 AI 技術解析透地雷達探查空洞資訊等，如圖 11~圖 13。

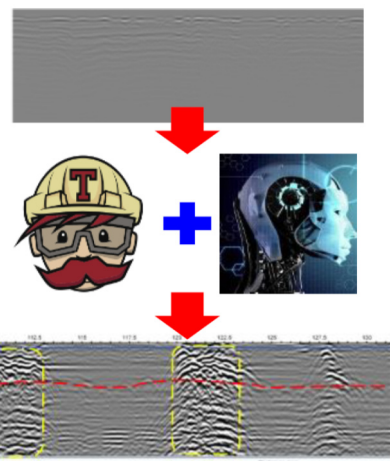


圖 13 AI 技術應用於透地雷達資料解析示意圖

AI 技術亦可應用於隧道異狀診斷與維護決策建議，例如將探查資料、地質條件、外力變化等諸多因子，透過 AI 演算分析，協助關鍵點診斷(如圖 14)，並據以提出維護建議。雖目前 AI 技術在隧道資料解析精度仍有待加強，但隨機器不斷學習與經驗累積，未來 AI 人工智慧技術勢必將納入新一代的智慧化隧道維護管理系統，透過 AI 人工智慧實現巨量複雜資料快速關聯性解析，並可協助提出維護決策建議。

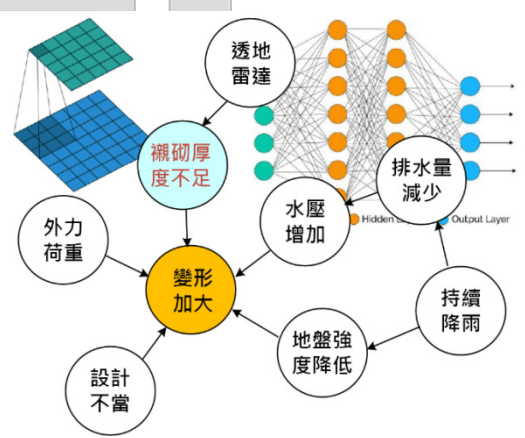


圖 14 AI 技術應用於隧道異狀診斷示意圖

(三) 大數據分析

隧道營運管理資料與設計施工階段資料之差異，除資料屬性外，最主要在於營運管理資料將隨隧道服務年限持續增加，同時營運資料亦具有龐雜特性，除土建結構資訊外，尚包括通風、照明、消防等重要機電設施資料，基本上已具備大數據 (Big Data) 特性。管理系統除將此大量資料電子化儲存與查詢外，亦應進行大數據分析與風險評估，進行主動式管理。例如照明通風及交控系統可依其使用年限，主動提醒管理人員追蹤各設備健康情形，並主動定期更新，如圖 15 所示。上述設備如被動等待故障後，再進行維修，可能有物料供應不及風險，同時在空窗期引發照明不足、通風效能不佳，影響隧道用路人安全。

智慧化系統亦需能將繁雜資料進行分類、回歸分析、排序、關聯分析，找出規律性，並運用決策樹、遺傳演算法、人工類神經網路等模型，優化隧道維護管理。例如上述照明通風設施的汰舊更新，可再進一步優化不同環境（如濱海或內陸）、不同設備功率、不同布置的最佳使用期限，再依據維護預算與更換排序，進行優化管理。

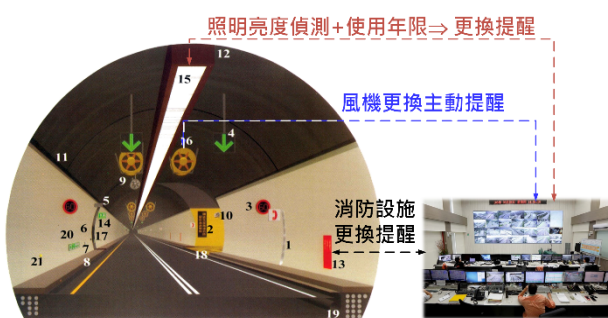


圖 15 隧道附屬設施更新主動提醒示意

(四) 物聯網技術整合

智慧化之隧道維護管理不僅在於找出結構安全異狀之處，有效能管控隧道營運亦為維護管理的要點。此點可透過隧道內感測器佈置及物聯網

資通訊技術，智慧化動態控管隧道通風及照明狀況（圖 16），兼顧節能及舒適安全要求。當偵測到隧道內有車禍、火災或危險駕駛情形時，可配合當時狀況即時啟動緊急應變計畫，包括緊急通報、適當消防及排煙措施，進洞車輛管制、車輛駕駛通報、疏散路線指示、疏散通道監控等，如圖 17。



圖 16 智慧化動態調節隧道照明示意圖

物聯網技術整合的實現，需涉及多項周邊技術與條件配合，包括車載電腦技術、AI 人工智慧、各式感測器發展、巨量資料雲端運算、控制系統穩定性等，上述條件整合看似複雜，但隨科技高速發展，未來實現並非遙不可及。

六、結語

目前隧道維護管理的思維，已由以往被動式損壞後再修復觀念，轉化為主動預防式維護與延壽導向。在此情形下，隧道資料的掌握極為重要，隨著科技進步與時間累積，資料量極為龐大繁瑣，必須透過維護管理系統來進行資料儲存、查詢、分析、展示與決策建議。近年來國內各隧道主管機關陸續推動隧道維護管理系統開發，部分系統已正式上線運作，惟其功能仍停留於資料庫

建置與查詢，並未進行資料分析加值應用與營運決策輔助建議功能。然隨工業 4.0 的興起，透過物聯網整合資料與服務，協助企業決策已成為未來趨勢，目前亦逐漸擴及公共建設全生命週期管理，未來由新科技導入、AI 人工智慧應用、大數據資料分析、物聯網技術整合等，我國隧道營運亦將朝向智慧化管理目標邁進，包括：1. 智慧化結構安全診斷、2. 智慧化營運效能管控、3. 通風照明節能優化、4. 重要事件智慧化通報、5. 智慧化避災引導疏散等，建構新一代智慧化隧道維護管理系統。

參考文獻

交通部公路總局 (2019) 交通部公路總局 107 年年報
交通部高速公路局北區養護工程分局 (2018) 國道隧道維護管理系統後續擴充專案期末報告, 財團法人中興工程顧問社
葛文忠、沈哲緯、陳先灝 (2019) 三維透地雷達結合 AI 判釋技術之方法初探, 財團法人中興工程顧問社
蕭富元、高憲彰、邵厚潔、林庭彥、許鈺漳 (2019) 臺灣公路隧道維護管理系統開發與挑戰, 第 18 屆海峽兩岸隧道與地下工程學術與技術研討會論文集, 重慶, 第 279-282 頁
Valdes, J., D. Thakker, V. Dimitrova, A.G. Cohn, P. and Thiaudiere (2015) Development of Decision Support System on Tunnel Diagnosis, ITA WTC 2015 Congress, Dubrovnik, Croatia

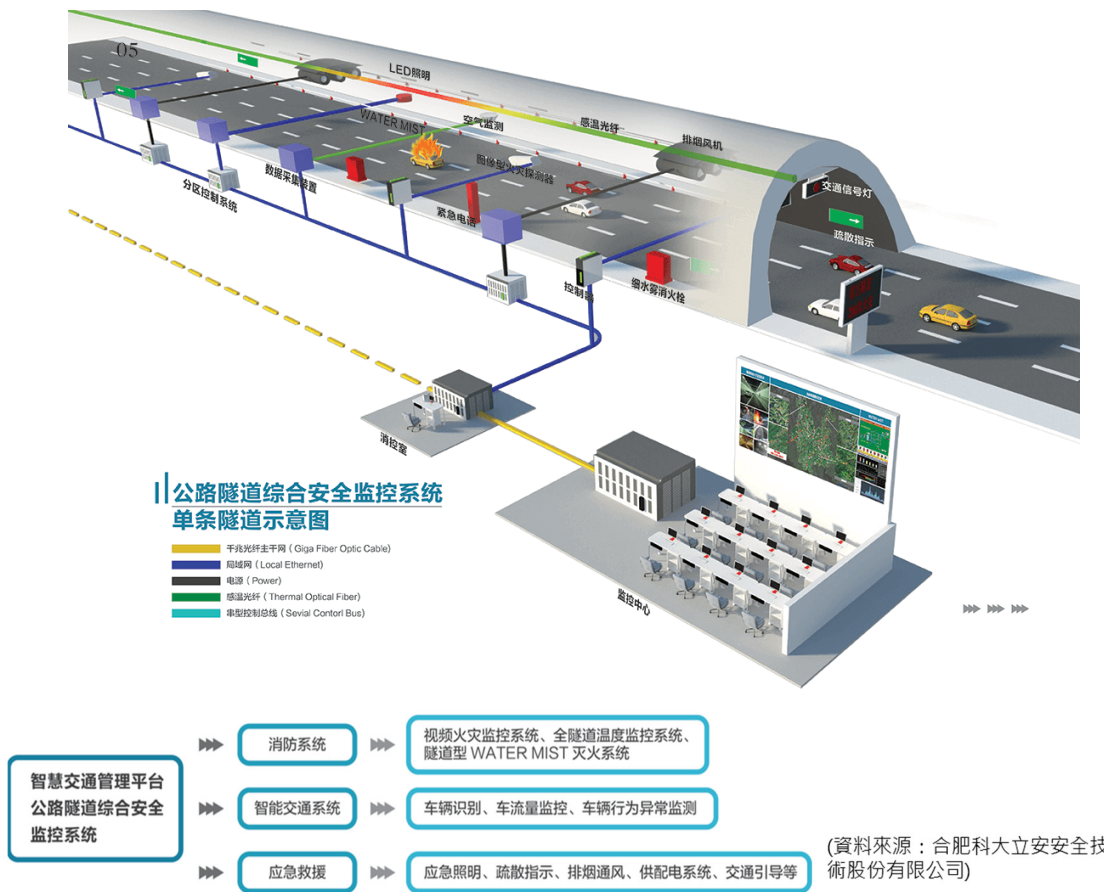


圖 17 物聯網技術應用於隧道智慧化營運管理示意圖